

도로 인프라 수준을 고려한 자율주행 기반 모빌리티 서비스 도입 방향 고찰

A Study on the Introduction for Automated Vehicle-based Mobility Service Considering the Level Of Service of Road Infrastructure

탁 세 현* · 김 해 곤** · 강 경 표*** · 이 동 훈****

* 주저자 : 한국교통연구원 부연구위원
 ** 공저자 : 한국교통연구원 연구원
 *** 공저자 : 한국교통연구원 연구위원
 **** 교신저자 : 한국교통연구원 부연구위원

Sehyun Tak* · Haegon Kim* · Kyeongpyo Kang* · Donghoun Lee*

* : The Korea Transport Institute

† Corresponding author : Donghoun Lee, donghoun.lee@koti.re.kr

Vol.18 No.5(2019)

October, 2019

pp.19~33

pISSN 1738-0774

eISSN 2384-1729

<https://doi.org/10.12815/kits.2019.18.5.19>

2019.18.5.19

Received 16 September 2019

Revised 30 September 2019

Accepted 1 October 2019

© 2019. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

버스 대중교통 서비스의 운영 효율성 향상을 위한 목적으로 자율주행차량을 기반으로 한 대중교통시스템 개발이 추진중에 있다. 그러나 대중교통시스템은 모빌리티 서비스 목적 및 방식에 따라 차량운행 환경이 크게 변화하므로, 자율주행기술을 효과적으로 도입하기 위해서는 모빌리티 서비스 유형에 따른 도로 적합도에 대한 평가가 선행되어야 한다. 이에 본 연구에서는 선행사례 조사를 통해 자율주행차량 기반 모빌리티 서비스 유형을 분류하고 재정의를 하였다. 제한된 서비스들의 적용 가능성 검토를 위해 실차 주행실험을 기반으로 도로 인프라 수준에 따른 자율주행 적합도 분석을 시행하였다. 또한 도로 적합도 분석결과를 토대로 국내 도로 인프라 수준을 고려한 모빌리티 서비스 도입 방향을 제시하였다. 본 연구결과는 향후 자율주행 기반의 대중교통시스템 개발에 활용 가능할 것으로 판단된다.

핵심어 : 버스 대중교통 서비스, 자율주행차량, 모빌리티 서비스, 도로 적합도, 인프라 수준

ABSTRACT

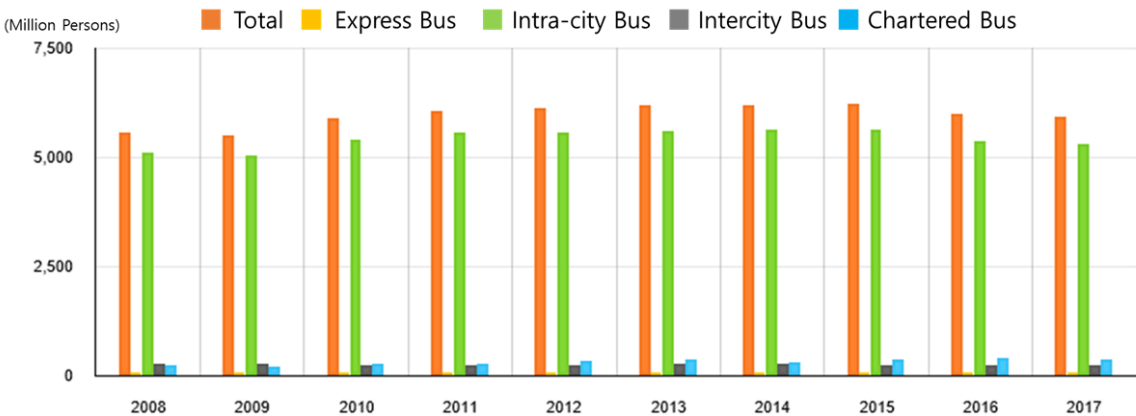
There have been enormous efforts to develop an innovative public transport bus service for enhancing its operational efficiency based on Automated Vehicle(AV). However, since the vehicle operating environment in the public transport system varies with the purpose and method of mobility service, it is necessary to preferentially evaluate the current roadworthiness for an effective way to introduce the AV. Therefore, this study classified and redefined AV-based mobility service based on literature reviews. This research conducted the roadworthiness test for checking the feasibilities of the AV-based mobility services. Furthermore, we suggested some deployment strategies of the AV-based mobility service considering the Level-Of-Service (LOS) of road infrastructure based on the results of roadworthiness tests. The proposed direction would have a great potential to introduce the AV-based public transport system in the near future.

Key words : Public transport bus service, Automated vehicle, Mobility service, Roadworthiness, Level-of-service of road infrastructure

I. 서론

1. 연구 배경 및 목적

지능형교통시스템(ITS, Intelligent Transportation System), 환승할인 및 전국 호환 교통카드 도입 및 확대 등으로 인해 국내의 버스 수단분담률은 전반적으로 증가해 왔다. <Fig. 1>은 2008년도부터 2017년도까지 발생한 수송수단별 여객 수송실적(명)을 나타낸다(E-index, 2019). 여객 수송실적을 살펴보면 수송수단과 관계없이 전반적으로 증가하거나 예년 수준을 유지해오다 2015년도를 기점으로 감소 추세를 보인다.



<Fig. 1> Statistics of annual passenger transport (Bus only) from 2008 to 2017

버스 여객 수송실적에 영향을 미치는 주된 요인으로 버스 운전기사 수 부족 및 침투 시간 정체로 인한 운영사 수익 저하를 고려할 수 있으며, 이는 모빌리티 서비스 수준 저하, 서비스 이용자 대기 시간 증가, 승차 실패 및 입석 승차와 같이 대중교통 모빌리티 서비스 편의성 저하로 이어지고 있다. 이러한 한계점을 극복하기 위한 목적으로 첫 구간·마지막 구간 이동(First and Last-Mile) 서비스 제공, 복합수송수단 간 상호 끊임없는 연계·통합 및 환승 서비스(Multi-modal Seamless Service) 제공과 같은 대중교통 모빌리티 서비스 혁신이 필요하다(Kim et al., 2019). 이를 위해 국내·외에서는 대중교통 자동화(Transit Automation)라는 관점에서 자율주행차량, 수요 응답형 수송서비스, 커넥티드 환경 및 디지털 인프라를 중심으로 한 기술 및 정책개발에 활발한 움직임이 있다(Stark et al., 2019). 그럼에도 불구하고 현재 대중교통의 자동화 수준은 다른 육상 교통수단인 승용차 및 트럭과 비교했을 때 초기 단계에 머물러있다. 특히 승용차와 트럭 자율주행 기술 및 서비스의 경우 주변 인프라와 통신을 기반으로 하는 자율협력주행에 대한 많은 실증연구를 기반으로 상용화 단계에 있는 반면, 중·소형 셔틀 버스는 통제된 도로 및 임시 운행여건이 갖추어진 일부 특수 구간에서만 운영되며 대형 버스는 국가 R&D과제로 수행되고 있는 등 아직 초기 단계의 자율주행 단계에 머무르고 있으며 상용화를 하기에 확장성 및 안전성 측면에서 한계를 보이고 있다(Buchler, 2018; Shen et al., 2018).

최근 주 '42시간 근무' 시대의 도래 및 버스의 운영 효율성 향상을 위하여 대중교통 서비스의 자율주행 차량 도입이 중요 대안 중의 하나로 대두되고 있다. 하지만 대중교통 서비스는 적용 서비스의 종류 및 형태에 따라 차량의 운행 환경이 크게 변화하므로 자율주행차량의 효과적인 도입을 위해서는 서비스 종류에 따른 현행 도로 인프라의 수준에 대한 평가가 선제적으로 필요하다. 더 나아가 이를 바탕으로 한 인프라 수준별

자율주행 기반 대중교통 서비스의 도입전략 도출이 필요하다. 이에 따라 본 연구에서는 자율주행기반 모빌리티 서비스 관련 선행사례 조사를 기반으로 서비스 유형을 분류하고 제공방식을 정의하고자 한다. 더불어 제시한 자율주행기반 모빌리티 서비스의 적용 가능성을 검토하기 위해 실차 실험을 수행하여 도로 인프라 적합도를 분석한다. 마지막으로 분석결과를 토대로 현재의 도로 인프라 수준을 고려해 모빌리티 서비스 도입 방향을 제시한다.

II. 선행사례 조사 및 고찰

대중교통수단으로 활용되는 모빌리티 서비스의 운영방식에 따라 크게 3가지로 분류할 수 있다. 광역도시권에서 주요 교통 허브를 연결하는 광역 및 간선버스, 교통 허브와 주요 목적지를 연결하는 지선 및 마을버스, 그리고 정해진 노선이 없거나 특정 수요를 대상으로 운행하는 택시(밴)이 있다. 광역 및 간선버스는 도시철도와 함께 대용량 교통 수요를 담당하고 있으며, 대부분 도시철도의 운행노선과 유사하게 운영되고 있다. 대표적으로 간선급행버스(BRT, Bus Rapid Transit)가 있으며, 대부분 버스전용도로(HOV¹) Lane를 기반으로 운영되고 있다. 지선 및 마을버스는 철도역 또는 간선버스 정류장 등과 출발지 또는 목적지까지 운행하는 수단으로서 산발적으로 발생하는 통행수요로 인해 대형차량 보다 용량과 운행노선이 짧다. 그뿐만 아니라, 통행수요도 광역 및 간선버스 운영방식에 따라 다양한 시간대에 걸쳐 발생하게 된다. 따라서 중소형 자율주행 차량의 운행구간은 First & Last miles 수요를 담당하는 솔루션으로 적용되고 있다. 더불어 통행수요가 산발적으로 발생하는 지역에서는 수요대응형 서비스도 가능한 수단이다. 반면, 현재 개인 또는 기업 규모로 운행되고 있는 승용차 기반 택시(밴)는 대표적인 공유서비스로써 제공되고 있다. 따라서 본 연구에서는 상기 모빌리티 서비스 운영방식에 따라 대형(Transit Bus), 중소형(Shuttle Bust) 및 택시(밴)으로 구분하고, 자율주행 기반 모빌리티 서비스의 국내외 선행사례를 조사하여 시사점을 도출하고자 한다.

1. 대형(Transit Bus)

1) 하네다공항

공항에서 운영될 자율주행차량 기반 수송 서비스 상용화를 목적으로 2019년 1월 일본 하네다공항에서 전일본공수(ANA), 닛포(NIPPO), SB 드라이브 등 6개 사가 자율주행 버스 실증 실험을 실시했다(Robot News, 2019). 히노 자동차의 ‘히노 판초’를 개조하여 실증하였으며, 실험 구간으로 하네다공항 제2터미널을 대상으로 총 600m를 시속 30km/h로 운행했다. 운전자가 탑승을 전제로 자율주행 레벨3의 수준으로 실증 실험을 진행했고, 차량 주행 제어 기술과 원격 운행관리 시스템, 자율주행차량운행에 필요한 환경 정비 등을 검증했다. 주행 경로상의 노면에 마그네틱 마커를 설치하고 버스 차량 바닥에 설치된 자석 마커를 인식하는 방식을 기반으로 주행했다.

2) 마에바시

일본 군마현 마에바시에서는 일본 최초로 자율주행 버스 상용화 실증 실험을 하고 있다(The Korea Economic Daily, 2019). 마에바시역에서 조모선 주오마에바시역 간 약 1km를 주 3~4일 하루 4회 왕복 운행한다. 차량 운

1) HOV: High -Occupancy Vehicle

전석에는 버스 기사가 탑승하지만, 비상시에만 수동운전을 한다. 차량의 제한 속도는 시속 40km/h이지만 실증 실험을 시속 20km/h 이내로 운행한다. 요금은 성인 한 사람당 100엔이며, 2020년 3월까지 실증 실험을 거쳐 상용화할 계획이다.

3) 서울

국내기업 KT는 2018년 1월 국내 최초로 국토교통부로부터 45인승 대형버스의 자율주행 허가를 취득했다 (Yonhap News, 2019). 전용도로와 도심의 일반도로를 운행할 수 있는 대형버스 차량은 75명 승객을 여러 차례 나눠 태우고 서울 강남대로, 테헤란로 일대에서 4시간 동안 시범 운행했다. 차체 길이는 12m, 차량 폭이 2.5m에 달하며 일반도로의 최소 차선폭인 3m를 유지하면서 운행한다. 대형버스 운행을 위해서는 정교한 제어가 필요함에 따라 5G와 LTE 기반 V2X(Vehicle-to-everything) 자율주행 방식을 도입해 차량 제어를 수행한다. 라이다, 카메라 등 기존 센서 이외에 KT 무선망을 이용하여 운행했으며, 시속 70km/h 이상의 고속주행뿐만 아니라 곡선 및 좌우회전, 보행자 탐지 등 안정적으로 운행할 수 있는 특징이 있다.

2. 중소형(Shuttle Bus)

1) 시온

스위스 시온(Sion)에서 스타트업인 베스트마일(Bestmile)이 나브야(Navya) 전기 차량을 이용하여 스마트 셔틀을 운영하고 있다(Bestmile, 2019). 2015년에 실험 주행을 마친 뒤, 2016년부터 공공도로에서 시속 20km/h로 최대 11명의 승객 수송이 가능하며 현재 무료로 운영 중이다. 총 2대의 차량을 운영하고 있으며 노선 경로를 기차역과 도심 2가지로 구분하여 시간대를 지정하여 서비스하고 있다.

2) 바트 바른바흐

독일 바트 바른바흐(Bad Birmbach)에서는 2017년부터 프랑스 이지마일(Easymile) EZ10 전기차를 이용해 자율주행 미니버스 운행을 시작했다(Kotra, 2019). 현재까지 총 10,000km 이상을 운행했으며, 약 2만 명의 승객을 운송했다. 서비스 초기 운행 거리는 약 700m 구간이었으나, 2018년부터는 1.5km를 운행하고 있다. 탑승 인원은 노선에 따라 최대 6명의 승객을 운송할 수 있다. 매일 오전 10시부터 오후 6시까지 30분 간격으로 시속 9km/h(최대 15~20km/h)로 운행하며, 요금은 무료로 운행되고 있다. 독일 교통법에 따라 미니버스에 안전 요원 1명이 상시 배치하고 있으며, 비상시 언제든지 자율주행버스를 중단하고 차량을 제어할 수 있다.

3) 헬싱키

2019년 3월 헬싱키에서 핀란드 Sensible 4와 일본 무지(MUJI)가 자율주행 버스 가차(Gacha)를 시범 운행하였다(Dezeen, 2019). 가차는 폭우, 안개, 눈 등 다양한 날씨에서 운전할 수 있는 자율주행 버스로 장애물 감지, 디지털 맵핑 및 센서 기술을 이용하여 안전하게 자율주행이 이루어질 수 있도록 하였다. 차량 디자인을 살펴보면 운전석이 별도로 없기 때문에 버스의 정면 또는 후면이 정의되어있지 않으며 버스 내부의 디자인이 부드럽고 둥근 모양으로 되어있어 좌석을 더 많이 확보할 수 있는 디자인으로 설계되었다. 2019년 4월부터 핀란드 에스포(Espoo)에서 일반 시민들을 대상으로 운행할 예정이며, 하반기에는 헬싱키에서 운행할 예정이다. 이용자는 스마트폰 애플리케이션을 통해 이용 가능한 주문형 버스이며, 기존의 운송서비스와 연계하여 상황에 따라 최적의 경로 및 운송방법을 선택하고 다른 서비스 간 환승도 쉽게 할 수 있다.

4) 시스타

스웨덴 시스타(KISTA)사에서 2018년 1월부터 2대의 자율주행버스가 평일 오전 7시부터 오후 6시까지 운행한다(Urban ICT Arena, 2019). 시속 12km/h(최대속도 24km)로 최대 12명을 운송할 수 있다. 버스는 사전에 기록된 가상 트랙을 운행하고 있으며 일반 차량과 동일한 노선에서 운행한다. 노선길이는 시스타 테크비즈 니스 지역의 시스타 갤러리아 쇼핑몰부터 스칸딕(Scandic) 호텔까지 1.5km를 운행하며 일반 시민들을 대상으로 요금은 무료이다. 스웨덴 교통법에 따라 차량에는 지정된 운전자가 상시 탑승하고 있어 위급상황에 대처할 수 있다.

5) 베이징

중국의 IT 기업인 바이두(Baidu)는 버스 제조사인 킹롱, 인텔과 협력하여 자율주행버스 아폴로(Apollo)를 개발했다. 아폴로는 핸들과 주행 페달이 없으며, 레벨 4수준으로 운행한다. 한번 충전으로 100km 이상 운행 가능하며 탑승 인원은 6명~7명이다. 세계 최초 AI 공원인 하이텐구 공원에서 2018년 11월 운행하기 시작하였으며 공원 서문과 공원 내 놀이공원까지 약 1km 구간을 정해진 운행 스케줄(15~20분 간격)로 운행한다. 운행 속도는 시속 10km/h로 운행이며, 탑승 요금은 무료이다. 이용자들은 사전에 'AI 미래 공원' 위챗(WeChat)을 통해 예약하여 체험해볼 수 있다. 승객은 차량 내에 설치되어있는 스크린을 통해 운행 상황을 확인할 수 있고 승객이 안전띠를 매면 자동으로 문을 닫고 출발한다.

6) 오키나와

일본 소프트뱅크의 자회사인 SB 드라이브(SB Drive)에서 일본의 초고령사회, 이동문제를 해결하기 위해서 자율주행차 프로젝트를 실시했다(Robot News, 2019). 2017년 3월 오키나와에서 히노자동차의 소형 버스 '리엡세'를 개조해 라이다, 카메라, 레이더 등을 장착하여 시험운행을 실시했으며, 시험운행 당시 일반 버스 속도와 같은 30km/h로 운행하였고 버스 정류장과 인도 사이 10m 이내로 정확하게 정차했다.

3. 택시(밴)

1) 피닉스

구글 웨이모(Waymo)는 2018년 12월 미국 애리조나주 피닉스에서 구글 지주회사인 알파벳의 자율주행 택시 서비스 웨이모 원(Waymo one)을 선보였다(EXTREMETECH, 2019). 웨이모의 자율주행차량은 크라이슬러 미니밴 '퍼시피카'를 모델로 하였으며, 자율주행 레벨 4단계 수준으로 평가된다. 애리조나 주 피닉스시 주변 160km 반경에서 약 400명 고객에 한정해 운행하고 있으며 테스트 기간에 웨이모 원 서비스를 체험한 사람을 대상으로 운행한다. 승차 인원도 최대 성인 3명, 어린이 1명으로 제한된다. 이 서비스는 웨이모 원 앱을 통해 하루 24시간 7일 이용 가능하며 이용방법은 이용자가 스마트폰 앱에서 목적지를 입력하면 승차지점 경로와 예상 가격이 표시된다. 5km, 15분 주행에 7.59달러(약 8,500원) 요금을 받는다. 비상상황을 대비해 사람이 운전석에 탑승하지만, 원칙적으로 모든 조작은 웨이모가 한다.

2) 요코하마

닛산(Nissan)은 일본의 모바일 게임 플랫폼 사업자인 DeNA Co.와 제휴하여 2018년 3월 가나가와현 요코하마시 미나토미라이 지구 주변에서 일반 탑승객 약 300명을 대상으로 이지라이드(Easy Ride)실증 실험을 시작한다고 발표했다(Robot News, 2019). 요코하마 월드 포터즈 쇼핑 센터(World Porters Shopping Center)에서 닛

산 복합단지(Nissan's Corporate Complex)의 4.5km 지역에서 제한적으로 제공한다. 이용자들의 안전 문제로 전문가가 탑승하고 있으며, 관제센터에서 차량의 상태를 실시간으로 모니터링하고 이용자에 대한 모니터링도 함께 제공하여 응급 상황이 발생할 경우에서 신속하게 대응할 수 있는 서비스를 제공한다.

3) 플로리다

자율주행 택시 사업 전문업체인 보야지(Voyage)가 2018년부터 플로리다 12만 5천여 명의 은퇴자 및 거동이 불편한 노인들이 거주하고 있는 ‘더 빌리지’에서 자율주행 택시 서비스를 제공하고 있다(The Villages Florida, 2019). 해당 서비스는 스마트폰 애플리케이션을 활용해 자율주행택시를 호출해 이용할 수 있으며, 실시간 지도 업데이트를 제공하여 통제된 환경속에서 최적의 길을 안내한다. 자율주행 특성상 안전 확보를 위해 보야지 직원이 운전석에 탑승하며 운행하고 있는 G2 차량은 크라이슬러 하이브리드 미니밴을 기반으로 자율주행 레벨 4 수준의 자율주행 서비스를 제공한다.

Ⅲ. 자율주행기반 모빌리티 서비스 유형 분류

1. 자율주행기반 모빌리티 서비스 주요 요인 선별

앞 장의 사례 조사·분석 결과를 토대로 자율주행기반 모빌리티 서비스에서 고려해야 할 몇 가지 주요 요인(Contributing Factor)을 도출할 수 있다. 첫 번째로 전용도로 구분 여부가 해당된다. 자율주행 자동차 기반의 모빌리티 서비스 운영을 위해 자율주행차량이 운행되는 별도의 인프라 시설 존재 여부로, 자율주행 전용도로(Dedicated lane) 또는 일반도로(Non-Dedicated lane)로 구분할 수 있다(Metz, 2018). 하지만 국내에서는 도로 설계기준에서 특정 교통수단의 분리에 관한 항목으로 간선급행버스체계(BRT)나 버스전용도로(HOV Lane), 자전거도로의 분리를 언급하고 있으나 자율주행차량 운영을 위한 시설 분리는 고려하지 않고 있다.

두 번째로 정류장(Station) 유무를 고려할 수 있다. 정류장 유무에 따라 승하차하는 정류장의 위치가 정해져 있으면 ‘고정(Fixed)’, 승하차하는 정류장은 있으나 승하차 위치가 수요 응답에 따라 운행하면 ‘비고정(Not Fixed)’, 승하차하는 정류장이 없으면 ‘정류장 없음’으로 구분할 수 있다(Shen et al., 2017).

세 번째로 정차 정류장 수(Number of Stations)에 따라 구분할 수 있다. 다수의 정류장에 정차하는 경우, 수요 응답에 따라 2~3개 정류장 또는 목적지에서만 정차하는 경우, 문전수송(door-to-door)과 같이 1~2개 목적지에서 정차하는 경우로 구분된다.

네 번째로 경로(노선) 운행방법을 고려한다. 운행경로에 따라 고정노선형(Fixed), 경로 이탈형(Semi-Fixed), 준 다이내믹 형(Flexible), 다이내믹 형(Virtual Flexible)으로 구분할 수 있다(Chavis, 2017). 여기서, 고정노선형은 운행노선과 운행 스케줄을 정하여 규칙적으로 운행하는 방법이고, 경로 이탈형은 운행시간은 정해져 있으나 정해진 노선에서 운행하면서 예약이 있는 경우 경로 이탈하여 운행하는 형태이다. 준 다이내믹 형은 기·종점의 운행시간은 정해져 있으며, 이용자의 수요 응답에 따라 운행경로를 정하는 방식이다. 다이내믹 형은 운행시간, 운행경로, 기·종점이 없이 이용자의 예약기반에 의해 운행하는 방식이다.

다섯 번째로 모빌리티 서비스 이용을 위한 접근방식(Access Type)이 있다. 접근방식으로 사전예약 기반으로 운영하는 방법(Pre-Booking)과 오픈 액세스(Open-Access) 방법이 존재한다. 오픈 액세스 방식은 즉시 탑승을 희망하는 모빌리티 서비스 이용자를 수용하는 방법과 Pre-Booking 방식을 포함한다(Linares et al., 2017).

마지막으로 운영횟수(Number of Operations)를 고려할 수 있다. 운영횟수에 따라 고정된 시간(Time-based)에

운영하는 방식과 이용자의 수요 응답(On-demand)에 따라 운영하는 방식으로 구분할 수 있으며, 고정된 시간은 일정 간격에 따라 운영하는 ‘Frequency’ 방식과 운행시간표에 따라 운영하는 ‘Schedule’ 방식이 있다 (Kamau et al., 2016).

2. 서비스 유형 도출

상기 도출된 주요 요인을 고려해 <Table 1>과 같이 S1부터 S7까지 총 7가지 유형의 자율주행차량 기반 모빌리티 서비스(AV-based Mobility Service)로 구분할 수 있다.

<Table 1> Type of AV-based mobility service

Contributing Factor	AV Fixed-Route Transit Service		AV On-Demand Transit Service		AV Paratransit (On-Demand)		S7. AV Taxi
	S1. Dedicated	S2. Non-Dedicated	S3. Group	S4. By-Pass	S5. Urban	S6. Rural	
Vehicle Type	Transit Bus						
				Shuttle Bus			
							Taxi(Van)
Dedicated Lane	○	×	×	×	×	×	×
Station	Fixed	Fixed	Not Fixed	Not Fixed	×	×	×
Number of Stations	Many	Many	Many	2~3	Many	Many	1~2
Route Type	Fixed	Fixed	Semi-Fixed	Flexible	Virtual Flexible	Flexible	Virtual Flexible
Access Type	Open-Access	Open-Access	Open-Access	Pre-Booking	Pre-Booking	Pre-Booking	Pre-Booking
Number of Operations	Time-based Frequency	Time-based Frequency	On-demand	On-demand	On-demand	Time-based Schedule	On-demand

S1 서비스 ‘AV Fixed-Route Transit Service(Dedicated)’는 대형 자율주행차량이 전용도로에서 고정노선으로 운영하는 모빌리티 서비스이며, S2 서비스 ‘AV Fixed-Route Transit Service(Non-Dedicated)’는 대형 자율주행차량이 일반도로에서 고정노선으로 운영하는 대중교통 서비스를 지칭한다

S3 서비스 ‘AV On-Demand Transit Service(Group)’은 대형 자율주행차량이 일반도로에서 출퇴근과 같은 이용자의 특정 수요 응답에 따라 운영하는 모빌리티 서비스로서, 출발지와 목적지가 몇 개로 한정되어 일부 고정 경로로 운영되거나, 출발지 또는 도착지에 대한 수요가 크게 변할 때 노선 변경이 가능한 모빌리티 서비스를 나타낸다.

S4 서비스 ‘AV On-Demand Transit Service(By-Pass)’는 대형 및 중소형 자율주행차량이 일반도로에서 이용자의 수요 응답에 따라 운영하는 대중교통 서비스로서, 일반적인 모빌리티 서비스가 모든 정류장에 정차해야 하는 것과는 다르게 서비스 이용 수요가 없는 곳에서는 무정차 운영하는 서비스를 가리킨다.

S5 서비스 ‘AV Paratransit(On-Demand):Urban’은 도심지에서 이용자의 수요에 따라 운영하는 중소형 자율주행차량 기반 모빌리티 서비스로 운영사의 효율성과 이용자의 편의성을 높이기 위한 용도로 활용되며, 전 화기, 스마트폰 앱 등을 이용한 사용자의 요청에 따라 일정 지역 안에서 경로, 정류장 등을 자유롭게 최적화하여 운행할 수 있는 특징이 있다.

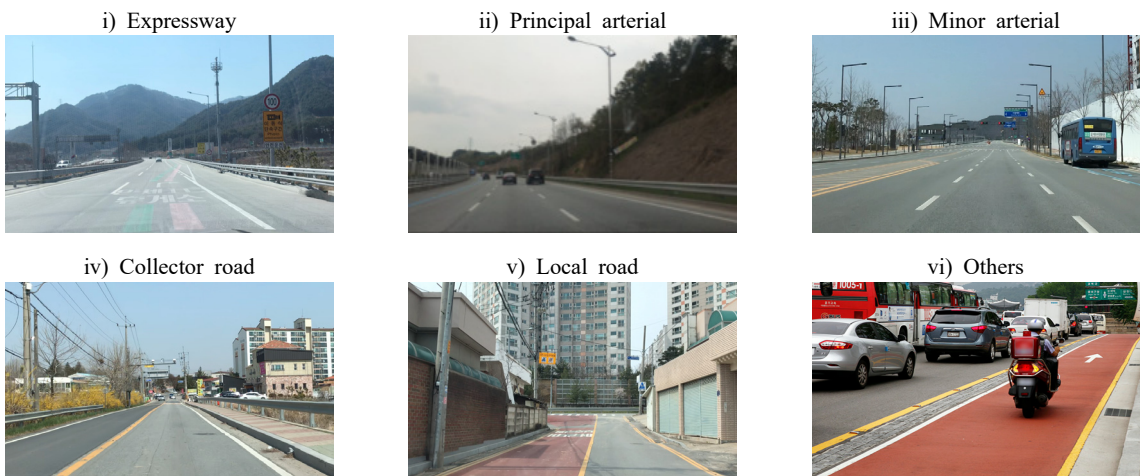
S6 서비스 ‘AV Paratransit(On-Demand):Rural’은 시골과 같은 소외지역에서 이용자들의 수요에 따라 운행하는 중소형 자율주행차량 기반 모빌리티 서비스이다. 도심지 서비스인 S5와 비교하였을 때 이용자 수가 적어 운영의 최적화보다는 사전 예약을 기반으로 한 이동성 확보와 운영사의 효율성 증진에 중점을 둔다.

S7 서비스 ‘AV Taxi’는 예약기반으로만 이용 가능하며, 이용자 수요에 따라 운행하는 승용차 또는 소형차량 기반의 모빌리티 서비스이다.

IV. 인프라 적합도 분석 및 서비스 도입전략 도출

1. 적합도 분석 방법

본 연구에서는 도로 인프라 수준에 따른 자율주행 적합도 평가를 위해 도로의 구조 및 시설에 관한 규칙에 따라 기능별로 도로를 구분하고 실차 실험을 통해 국내 인프라에서의 자율주행차량 주행 환경을 분석한다. 도로 기능에 따라 고속도로와 일반도로로 구분한다. 고속도로(Expressway)는 「고속국도법」 제2조(용어의 정의)에 의거 자동차 교통망의 중추부분을 이루는 중요한 도시를 연결하는 자동차전용의 고속교통에 속하는 도로로 고속국도를 일컫는다. 일반도로는 「도로법」에 근거하여 그 기능에 따라 주간선도로(Principal Arterial), 보조간선도로(Minor Arterial), 집산도로(Collector Road), 국지도로(Local Road), 특수도로(Others)로 구분되며, 폭 4m 이상으로 원활한 교통소통을 위해 설치되는 도로를 지칭한다. 여기서, 주간선도로는 시·군내 주요지역을 연결하거나, 시·군 상호간을 연결하여 대량통과 교통을 처리하는 도로로써 시·군의 골격을 형성하는 도로이다. 보조간선도로는 주간선도로를 집산도로 또는 주요 교통 발생원과 연결하여 시·군 교통의 집산기능을 하는 도로로 근린주거구역의 외곽을 형성하는 도로이다. 보조집산도로는 근린주거구역의 교통을 보조간선도로에 연결하여 근린주거구역 내 교통의 집산기능을 하는 도로로 근린주거구역의 내부를 구획하는 도로이다. 국지도로는 가구(도로로 둘러싸인 일단의 지역)를 구획하는 도로이다. 특수도로는 보행자 전용도로, 자전거전용도로 등 자동차 외의 교통에 전용되는 도로이다. 상기 구분의 버스전용도로를 포함한 도로 유형 구분예시로 <Fig. 2>과 같이 나타낼 수 있다.



<Fig. 2> Types of roads

본 연구에서는 자동차가 이용할 수 없는 특수도로는 제외한 나머지 도로 구분에 따라 모빌리티 서비스별 운행 가능한 도로를 검토하였으며, <Table 2>과 같이 나타낼 수 있다. 서비스 유형 1에 해당하는 S1(AV Fixed-Route Transit Service(Dedicated)) 서비스의 경우 버스전용도로와 고속국도에서 운영 가능하며, S2(AV Fixed-Route Transit Service(Non-Dedicated)) 서비스는 고속국도와 주간선도로에서 운영할 수 있다. S3(AV On-Demand Transit Service(Group)) 서비스는 고속국도, 주간선도로, 보조간선도로에서 운영 가능하며, S4(AV On-Demand Transit Service(By-Pass)) 서비스는 주간선도로와 보조간선도로에서 적용 가능하다. S5(AV Paratransit(On-Demand):Urban) 서비스는 주간선도로, 보조간선도로, 집산도로에서 운영할 수 있으며, S6(AV Paratransit(On-Demand):Rural) 서비스는 국지도로에 적용 가능하다. S7(AV Taxi) 서비스의 경우 버스전용도로를 제외한 나머지 도로에서 운영 가능하다.

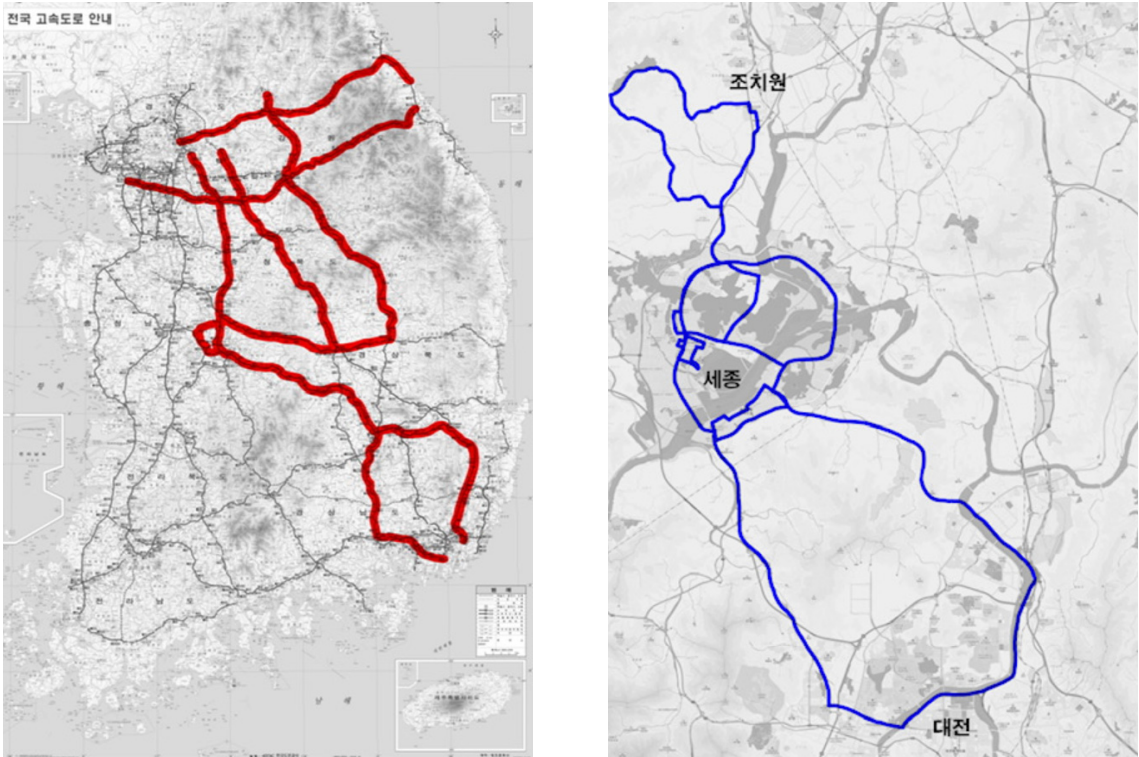
<Table 2> Roadworthiness of mobility service with respect to type of road

Type of Service \ Type of Road	S1 AV Fixed-Route Transit Service (Dedicated)	S2 AV Fixed-Route Transit Service(Non-Dedicated)	S3 AV On-Demand Transit Service (Group)	S4 AV On-Demand Transit Service (By-Pass)	S5 AV Paratransit (On-Demand) :Urban	S6 AV Paratransit (On-Demand) :Rural	S7 AV Taxi
HOV Lane	○						
Expressway	○	○	○				○
Principal Arterial		○	○	○	○		○
Minor Arterial			○	○	○		○
Collector Road					○	○	○
Local Road						○	○

실차 실험시 국제자동차기술자협회(SAE, Society of Automotive Engineers) 레벨2 수준의 자율주행기술을 적용한 A사 차량을 이용했으며, 인프라 적정수준 검토를 위한 항목으로 대표적인 자율주행 기능 중 하나인 차로유지보조(LFA, Lane Following Assist) 기능을 고려했다. 차로유지보조 기능은 카메라 등 비전 센서를 기반으로 차선을 인식하여 차량이 차선의 중앙을 안전하게 주행할 수 있도록 조향 장치를 자동으로 제어하는 기능을 수행한다. 실차 실험은 고속도로, 버스전용도로, 주간선도로, 보조간선도로 및 집산도로를 포함하는 공간적 대상지를 기반으로 도로 인프라를 구분하여 수행하였으며, 구분별 실차 주행거리(Kilometers Traveled) 및 공간적 범위는 각각 <Table 3>과 <Fig. 3>과 같다.

<Table 3> Kilometers traveled for field operational test

Type of Road	Kilometers Traveled
Expressway	1960
HOV Lane	23
Principal Arterial	27
Minor Arterial	16
Collector Road	11



<Fig. 3> Test site for field operational test

상기 주요 분석 항목을 토대로 도로 유형 구분에 따른 위험상황 발생주기(km/회)를 측정하고, 위험상황 형태(Occurrence Type)로 차선이탈(Lane Departure Event), 차선 쏠림(Lane Centering Failure), 작동 불능(Inoperative)으로 구분하여 산출한다. 여기서 차선이탈은 차량이 도로를 주행하면서 차선을 이탈하는 경우를 일컫고, 차선 쏠림은 차량이 차선에서 왼쪽 또는 오른쪽 한 방향으로 치우쳐지는 현상을 지칭하며, 작동 불능은 차로유지보조 기능이 작동 불가능한 경우를 의미한다. 더불어 도로 유형 구분에 따른 위험발생주기 측정값을 토대로 위험 발생원인을 분석하고 시사점을 도출하고자 한다.

2. 적합도 분석 결과

실차 실험을 통해 도로 유형별 위험상황 발생주기(km/회)를 <Table 4>와 같이 도출했다. 결과를 보면 알 수 있듯이 고속도로, 주간선도로, 버스전용도로, 보조간선도로, 집산도로, 국지도로 순으로 자율주행 기능 적용이 용이한 것으로 나타났다.

<Table 4> The statistics of hazard frequency with respect to type of road (unit:km/event occurrence)

Occurrence Type	Expressway	HOV Lane	Principal Arterial	Minor Arterial	Collector Road	Local Road
Lane Departure Event	384	6	27	5	2	-
Lane Centering Failure	41	4	27	4	1	-
Inoperative	43	8	14	2	3	-

도로 유형 구분별 위험상황 발생원인을 살펴보면 <Fig. 4>와 같이 나타낼 수 있다. 고속도로의 경우 교차로 및 신호기가 없는 관계로 다른 유형의 도로들에 비해 자율주행 기능이 잘 동작하였으나, 급격한 커브구간 및 차선 인식 실패로 인해 차선이탈 현상이 발생했다. 더불어 차선이 없거나 끊긴 구간, 터널반복구간, 2겹차선 구간에서 위험상황이 발생했으며 그림자, 우천 및 노면 색의 불균질성으로 인한 쏠림 현상도 종종 발생했다. 버스전용도로에서는 일부 급격한 기하 구조가 변화하는 구간에서 차선이탈 및 쏠림 현상이 발생했으며, 교량 및 지하도로 경사구간에서 차로유지보조 기능이 작동하지 않았다. 반면, 주간선도로에서는 다른 유형의 도로들에 비해 차선이탈, 차선 쏠림, 작동 불능 구간의 횡수가 낮게 나타났으며, 이는 교차로 및 과속방지턱이 없는 이유로 인한 것으로 추정된다. 하지만 급격한 커브 구간에서는 여전히 차선이탈 현상이 발생했으며, 좁은 도로 폭 구간에서도 차선이탈 현상을 발견할 수 있었다. 보조 간선도로의 경우 급격한 커브 구간, 도로 폭이 불균질한 구간 및 다수의 과속방지턱으로 인해 차로유지보조 기능 작동이 불가하였다. 더 나아가 집산도로의 경우 도로 갓길에 불법 주정차된 차량들과 열악한 차선 상태로 인해 자율주행 기능 작동이 불가했으며, 도로상에 차량이 아닌 장애물이 있거나 과속방지턱으로 인해 기능 오류가 빈번히 발생했다. 국지도로의 경우 차선이 존재하지 않고 도로상에 주차된 차량이 매우 많아 차로유지보조 기능이 전혀 작동하지 않았다.



<Fig. 4> Contributing factors in different types of roads

3. 서비스 도입전략 수립

1) S1(AV Fixed-Route Transit Service(Dedicated)) 서비스 도입전략

급행버스가 운행되는 간선급행체계(BRT) 구간에서는 일반 차량과의 혼재가 적고 독립된 전용도로에서 버스를 운행하고 있어 자율주행을 도입하기에 유리한 인프라 조건을 가지고 있다. 다만, 일부 구간에서는 공사상의 편의로 인하여 일부 급격한 기하 구조 변화가 발생하는데 이러한 부분에 대한 기하 구조가 개선된다면 가장 빠르게 자율주행 기반의 대중교통 시스템을 도입할 수 있을 것으로 보인다.

2) S2(AV Fixed-Route Transit Service(Non-Dedicated)) 서비스 도입전략

S2 서비스가 운행되는 고속국도 및 주간선도로는 현재 기하 구조가 자율주행을 하기에 높은 적합도를 나타낸다. 따라서 현행 기술 수준에서 대형 버스를 위한 변수 조정 및 버스 자동 주정차 기술과 같은 몇몇 기

술만 개발이 된다면 빠른 서비스 적용 및 상용 서비스가 가능할 것으로 판단된다. 다만, 커브 구간에서의 정체 탐지 및 보행자 탐지와 같은 일부 차세대첨단교통시스템(C-ITS, Cooperative Intelligent Transportation System) 안전 지원 서비스와 결합한다면 자율주행차량의 안전성능을 더욱 강화할 수 있을 것으로 보인다. 이와 함께, 경로 설정과 정류장 정차의 기능도 자동화하기 위해서는 낮은 수준의 정밀 지도의 활용도 필요할 것으로 보인다.

3) S3(AV On-Demand Transit Service(Group)) 및 S4(AV On-Demand Transit Service(By-Pass)) 서비스 도입전략

실차 실험 결과를 통해 알 수 있듯이 보조간선도로 상에서의 S3 서비스와 S4 서비스 도입은 도로의 급격한 기하구조의 변화, 불균질한 도로 폭, 높은 교통 밀도, 급경사 구간 등의 이유로 현행 자율주행 기술의 빠른 도입에는 한계를 가지고 있다. 이에 S3 서비스와 S4 서비스의 안정적 도입을 위해서는 기하구조의 개선이 필요하지만, 공사비용과 공사 기간 등의 현실을 고려할 때 주행 전 구간에 대한 기하구조 개선에 다소 어려움이 따를 것으로 사료된다. 따라서 보조간선도로 상에서의 S3 서비스와 S4 서비스는 물리적 인프라의 개선과 함께 고정밀 지도와 같은 디지털 인프라의 구축, C-ITS의 구축을 통한 적극적인 안전지원 서비스의 제공이 함께 필요하다. 광역적인 물리적 인프라의 개선 비용보다 고정밀 지도 및 C-ITS의 구축 비용이 적은 것을 고려하면 가격 대비 효용성도 우수할 것으로 보인다.

4) S5(AV Paratransit(On-Demand):Urban) 서비스 도입전략

S5 서비스는 도로 인프라의 자율주행 적합도가 낮은 간선도로 및 집산도로에서도 서비스를 제공하여야 한다. 특히 간선도로 및 집산도로에서는 차선 상태 불량, 불법 주정차 차량, 좁은 도로 폭에서의 급커브, 장애물 및 보행자, 과속방지턱 등 다양한 요인에 대한 대책이 수반되어야 자율주행차량기반 서비스 도입이 가능할 것으로 예상된다. 이를 위해서는 동적 지도를 기반으로 하는 안전 주행, C-ITS와의 연계를 통한 보행자 사고 예방 등 안전성능 강화 기술의 적용이 필요하다. 이와 함께 수요응답 서비스의 제공을 위해서는 클라우드 및 도시 통합 정보 기술을 기반으로 사용자의 편의성을 향상시키는 것도 중요할 것으로 사료된다.

5) S6(AV Paratransit(On-Demand):Rural) 서비스 도입전략

S6 서비스가 제공되는 국지도로는 자율주행 적합도가 매우 낮아 현행 도로에서의 자율주행은 거의 불가능하다. 이에 S6 서비스 제공을 위해서는 소외지역 전체에 대중교통 서비스를 제공하기 보다는 서비스 제공을 위한 주요 노선을 설정하고 주요 노선 위주로 디지털 인프라를 구축하는 전략을 취하는 것이 빠른 상용화를 위해서 유리할 것으로 보인다. 더불어 S6 서비스는 운행지역의 물리적 인프라 수준이 낮기 때문에 디지털 인프라를 적극 활용하는 것이 유리할 것으로 예상된다. 소외지역의 모빌리티 이용객 수 대비 디지털 인프라의 구축 비용이 큰 지역이 발생할 수 있으므로 주요 서비스 제공 노선을 구축하고 점차 전략적으로 제공 확대하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

6) S7(AV Taxi) 서비스 도입전략

S7 서비스는 전 도로에서 운행하는 것을 목적으로 하고 있어 다른 서비스와 비교하였을 때 난이도가 가장 높을 것으로 보인다. 이에 따라, 해당 서비스의 빠른 도입을 위해서는 주요 노선을 설정하여 수익성과 안전성을 확보하고 점차 영역을 확대하는 것이 유리할 것으로 보인다. 이러한 예시로 구글의 웨이모는 수요가 크고 이동 패턴이 비교적 단순한 출·퇴근 서비스를 먼저 제공하고 있으며, 이를 기반으로 향후 확대할 예정이다.

V. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 선행 사례 조사 및 고찰을 통해 자율주행 기술 기반의 모빌리티 서비스를 제시했다. 해당 서비스는 전용 도로의 사용 유무, 정류장의 이용 형태, 정차 정류장수, 노선의 운행 형태, 이용 방식, 운영 스케줄 형태를 기반으로 S1부터 S7까지 총 7가지 유형의 모빌리티 서비스를 분류·도출했다. 도로 분류에 따른 모빌리티 서비스별 자율주행 운영이 가능한 도로 인프라의 적합도 수준을 검토하기 위해 자율주행 레벨 2의 기능이 탑재된 차량을 활용해 실도로 주행 조사를 수행했고, 조사 대상으로 버스전용도로, 고속국도, 주간선도로, 보조간선도로, 집산도로, 국지도로를 고려했다. 실차 실험 결과 버스전용도로, 고속국도 및 주간선도로는 자율주행차량의 주행 적합도가 높게 나타났던 반면, 보조간선도로와 집산도로는 기하 구조의 급격한 변화와 낮은 도로 유지 보수 수준으로 인하여 자율주행의 안전주행이 제한적이었다. 국지도로의 경우 자율주행차량의 주행 적합도가 매우 낮게 나타난 관계로, 안전하고 안정적인 자율주행의 도입을 위해서는 기하 구조의 개선과 함께 디지털 인프라를 적극 활용하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 더 나아가 본 연구에서는 도로 인프라 적합도 분석결과를 토대로 7가지 유형의 모빌리티 서비스별 도입전략에 대해 제시했다. 비교적 현행 도로 인프라의 자율주행 적합도가 높은 S1 서비스와 S2 서비스는 기존 도로 인프라의 큰 개선 없이 자율주행 기반의 대중교통 시스템 도입이 가능할 것으로 기대되는 반면, 인프라 적합도 수준이 중간 정도인 S3 서비스와 S4 서비스의 경우 물리적 인프라의 개선과 함께 고정밀 지도와 같은 디지털 인프라의 구축, C-ITS의 구축을 통한 적극적인 안전지원 서비스의 제공을 통합적으로 고려한 최적화 솔루션의 개발이 요구된다. S5 서비스와 S6 서비스는 차선 상태 불량, 불법 주정차 차량, 좁은 도로 폭에서의 급커브, 장애물 및 보행자, 과속방지턱 등의 다양한 요인에 대한 대책이 수반되어야 자율주행기반 모빌리티 서비스 도입이 가능할 것으로 예상된다. 특히 S6 서비스가 제공되는 국지도로의 경우 현행 도로의 자율주행 적합도 수준이 매우 낮으므로 주요 노선 위주로 디지털 인프라를 구축하는 전략을 취하는 것이 빠른 상용화를 위해서 유리할 것으로 사료된다.

본 연구는 운영 수익 저하 및 모빌리티 서비스 수준 저하 등 대중교통의 한계 극복을 위한 대중교통 자동화의 일환으로 자율주행 기반의 모빌리티 서비스를 제안하고 현재의 도로 인프라 수준을 고려해 제시한 모빌리티 서비스 도입 방향에 대한 연구를 수행했다. 그러나 여전히 추가로 고려해야 할 부분들이 산재해 있다. 향후 연구에서는 국가교통분야 최상위계획인 국가기간교통망계획 수립에 활용될 목적으로 현재의 도로 인프라 수준을 고려한 모빌리티 서비스 도입전략에 대한 단계별 추진전략과 추진사업에 대한 정책 제언을 제시하고자 한다. 더불어 자율주행 기반 모빌리티 서비스 적용을 위한 필요 기술을 조사·분석하여 서비스 도입 로드맵을 상세화하고자 한다. 더 나아가 향후 도입될 모빌리티 서비스의 운영 효율성 관리 차원의 모니터링 기능을 이행하기 위해 서비스 요구사항을 구체화하여 서비스 상태를 관리·감독할 수 있는 지표개발 연구를 수행하고자 한다. 마지막으로 계획, 운영 및 관리 차원의 평가지표를 세분화하여 다양한 신규 서비스에 대한 평가를 수행할 수 있는 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부 교통물류연구사업의 연구비지원(19TLRP-B146733-02)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Bestmile, <https://bestmile.com>, 2019.09.01.
- Buehler R.(2018), “Can Public Transportation Compete with Automated and Connected Cars?,” *Journal of Public Transportation*, vol. 21, no. 1, pp.7-18.
- Chavis C. and Gayah V. V.(2017), “Development of a Mode Choice Model for General Purpose Flexible-Route Transit Systems,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2650, no. 1, pp.133-141.
- Dezeen, <https://www.dezeen.com/2018/11/02/muji-sensible-4-gacha-autonomous-shuttle-bus-finland-driverless-design>, 2019.09.01.
- E-index, https://www.index.go.kr/potal/stts/idxMain/selectPoSttsIdxMainPrint.do?idx_cd=1258&board_cd=INDX_001, 2019.09.01.
- EXTREMETECH, <http://www.extremetech.com/extreme/281776-waymo-launches-consumer-self-driving-car-service-in-arizona>, 2019.09.01.
- Kamau J., Ahmed A., Rebeiro-H A., Kitaoka H., Okajima H. and Ripon Z. H.(2016), “Demand Responsive Mobility as a Service,” *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, pp.1741-1746.
- Kim M., Kim H. and Kim H.(2019), “Study on Defining FMM and LMM Service Area Using Smart Mobility in Haeundae-gu, Busan,” *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 37, no. 3, pp.245-253.
- Kotra, <http://news.kotra.or.kr/user/globalAllBbs/kotranews/album/2/globalBbsDataAllView.do?dataIdx=162096&searchNationCd=101013>, 2019.09.01.
- Linares M. P., Barceló J., Carmona C. and Montero L.(2017), “Analysis and Operational Challenges of Dynamic Ride Sharing Demand Responsive Transportation Model,” *Transportation Research Procedia*, vol. 21, pp.110-129.
- Metz D.(2018), “Developing Policy for Urban Autonomous Vehicles: Impact on Congestion,” *Urban Science*, vol. 2, no. 2, pp.33-43.
- Robot News, <http://www.irobotnews.com/news/articleView.html?idxno=10322>, 2019.09.01.
- Robot News, <http://www.irobotnews.com/news/articleView.html?idxno=13252>, 2019.09.01.
- Robot News, <http://www.irobotnews.com/news/articleView.html?idxno=16104>, 2019.09.01.
- Shen J., Yang S., Gao X. and Qiu F.(2017), “Vehicle Routing and Scheduling of Demand-Responsive Connector with On-Demand Stations,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 9, no. 6, pp.1-10.
- Shen Y., Zhang H. and Zhao J.(2018), “Integrating Shared Autonomous Vehicle in Public Transportation System: A Supply-side Simulation of the First-mile Service in Singapore,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 113, pp.125-136.
- Stark K., Gade K. and Heinrichs D.(2019), “What Does the Future of Automated Driving Mean for Public Transportation?,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2673, no. 2, pp.85-93.
- The Korea Economic Daily, <https://www.hankyung.com/international/article/2019012023871>, 2019.09.01.
- The Villages Florida, <https://voyage.auto/community/the-villages-florida>, 2019.09.01.

Transport Topics, <https://www.ttnews.com/articles/waymo-program-arizona-focuses-commuters-using-public-transit>, 2019.09.12.

Urban ICT Arena, <http://www.urbanictarena.se/smart-self-driving-buses-start-operating-kista-today>, 2019.09.01.

Yonhap News, <https://www.yna.co.kr/view/AKR20180108050600017>, 2019.09.01.

ZDNet Korea, <http://www.zdnet.co.kr/view/?no=20181105073018>, 2019.09.01.